

工學碩士學位論文

Flexible 광전극을 이용하여 제작된
DSSC의 특성연구



2022 年 2月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

鄭榮起

工學碩士學位論文

Flexible 광전극을 이용하여 제작된
DSSC의 특성연구

指導教授 權 聖 烈

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2022 年 2月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

鄭 榮 起

鄭榮起의 工學碩士 學位論文을 認准함

2022年 2月 25日



主 審 工學博士 裴 鐘 一 印

委 員 工學博士 許 英 煥 印

委 員 工學博士 權 聖 烈 印

목 차

목차	i
그림 목차	ii
표 목차	iii
Abstract	iv
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
제 2 장 이론적 배경	7
2.1 태양전지의 종류	7
2.2 DSSC	13
2.3 DSSC의 메커니즘	18
2.4 DSSC 제작	26
제 3 장 실험결과	32
3.1 저온소성으로 제작된 TiO ₂ 광전극의 특성	32
3.2 ITO film substrate DSSC의 특성 결과	35
3.3 Ti foil substrate DSSC의 특성 결과	38
제 4 장 결 론	41
참고 문헌	43

표 목차

표 1	TiO ₂ 페이스트에 사용 된 TTIP의 몰비	27
표 2	TTIP mol 비율에 따른 DSSC 효율측정 결과	33
표 3	DSSC 효율특성 (A) FTO glass / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (B) ITO film / TTIP 0.5 mol / 150 °C, (C) ITO film / TTIP 0.5 mol / 120 °C	37
표 4	DSSC 효율특성 (A) FTO glass / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (B) Ti foil / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (C) Ti foil / TiO ₂ paste / 450 °C	40

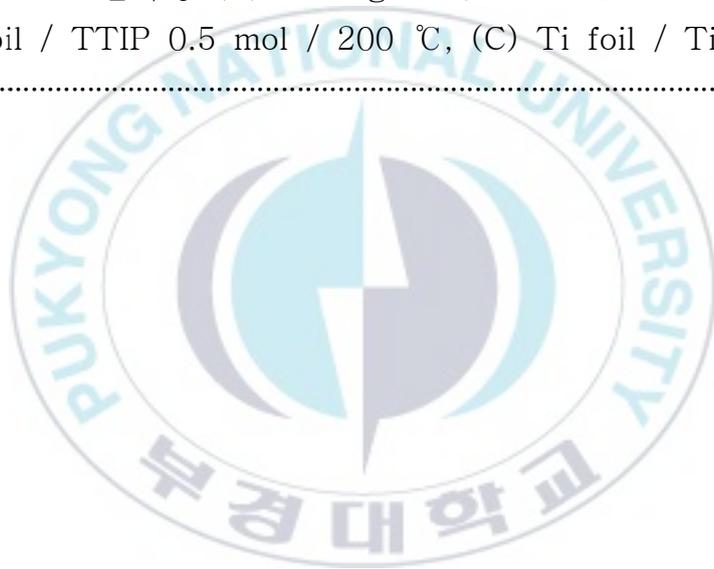


그림 목차

그림 1 에너지기본계획-에너지 감축 목표(안)	1
그림 2 석탄발전 인허가와 미세먼지 배출량	4
그림 3 LCOE 산정법	7
그림 4 태양전지의 세대별 분류표	8
그림 5 태양전지의 소재별 분류	8
그림 6 (a) 페로브스카이트의 기본 결정구조와 (b) 고효율 태양 전지에 사용되는 MAPbI ₃	12
그림 7 염료감응형 태양전자의 동작원리	16
그림 8 염료감응형 태양전지의 구조	18
그림 9 반도체의 전도띠 에너지	21
그림 10 리간드에 따른 루테튬 염료의 가시광 흡수 파장의 변 화	23
그림 11 TTIP의 구조	25
그림 12 DSSC의 제조 공정	30
그림 13 Flexible substrate 염료감응형 태양전지의 제작 구조 (A) Ti foil substrate (b) ITO film substrate	31
그림 14 TiO ₂ paste를 이용해 450 °C로 소성한 TiO ₂ layer와 TTIP 0.5 mol 비율로 200 °C로 소성하여 제작된 TiO ₂ later의 XRD 결과	32
그림 15 TTIP 첨가량을 달리하여 형성된 광전극으로 제작된 DSSC의 J-V curve	34
그림 16 DSSC J-V curve (A) FTO glass / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (B) ITO film / TTIP 0.5 mol / 150 °C, (C) ITO film / TTIP 0.5 mol / 120 °C	37
그림 17 DSSC J-V curve (A) FTO glass / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (B) Ti foil / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (C) Ti foil / TiO ₂ paste / 450 °C	40

**Characteristics study of DSSCs manufactured using
flexible photoelectrodes**

Young-Ki Jeong

*Department of Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Pukyong National University*

Abstract

Abstract –

The dye-sensitized solar cell may have a flexibility like CIGS rather than an efficient function like a silicon cell. And by applying to BIPV, aesthetic and interior elements are also considered.

It is expected that the possibility of commercialization can be accelerated through the flexibility of installation and R&D as an element of emergency energy and zero-energy buildings.

In this study, the efficiency characteristics of DSSC prepared by manufacturing TiO_2 paste for low temperature firing with the existing TTIP were applied to each substrate

and then measured.

As a result of applying TiO₂ paste for low-temperature firing to the existing FTO glass, it showed the highest efficiency of 4.138% in 0.5 mol of TTIP, and was then tested using TiO₂ paste with the same 0.5 mol of TTIP added in the experiment.

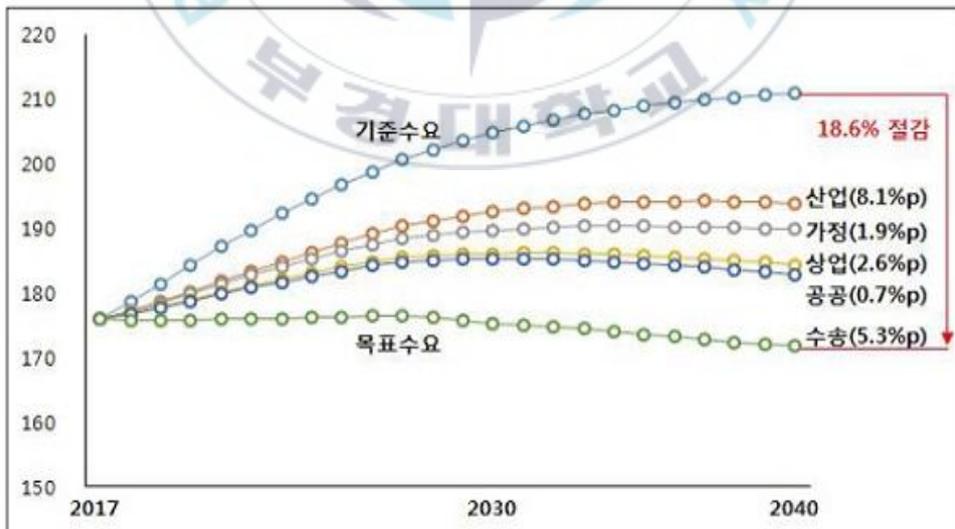
When manufacturing DSSC using ITO film as substrate, the result value was relatively low compared to FTO glass due to the limitation of heat resistance of ITO film. This seems to be due to an increase in charge transfer resistance. As a result of examining the efficiency and electrical characteristics of DSSC manufactured with ITO film substrate, it is determined that it is necessary to stably form a photoelectrode at a lower temperature to maintain a complete flexible form and aesthetics and ensure the performance of a solar cell. If this problem is solved, it will be possible to manufacture with a low unit price and a simple process compared to the existing sputtering method and the roll to roll method containing the same.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

원자력 발전과 화석에너지를 이용한 발전을 줄이고 이를 통해 재생에너지를 늘리는 것은 ‘안전하고 깨끗한 에너지’를 통해 이상 기후변화 등의 환경문제를 해결해 나가려는 세계적인 정책의 흐름이다.

우리나라 역시 세계적인 흐름에 맞춰 에너지 전환을 추진하고 있다. 전통에너지원인 석탄과 원자력발전의 비중을 줄이고 친환경에너지원인 태양광, 풍력 등의 재생에너지의 비중을 늘리고 있다. 정부의 재생에너지 발전비중을 2017년 7.6%에서 2030년에는 20% 2040년에는 30~35%를 목표로 하고 있다.



(자료=제3차 에너지기본계획)

<그림1> 에너지기본계획-에너지 감축 목표(안)

이러한 에너지 변환을 정책으로 추구하는 이유에는 많은 이유가 있다. 첫째 재생에너지의 발전과 확대는 세계적이 추세이며 많은 협정과 협력을 통해 이를 진행하고 있다.

둘째 원자력 에너지 발전소의 밀집에 의한 피해예방과 화석에너지 등의 환경오염 요소들에 대한 근본대책 마련이 시급하다. 특히 미세먼지에 대한 이슈는 에너지 전환의 필요성을 체감하게 한다.



<그림2> 석탄발전 인허가와 미세먼지 배출량

그림2와 같이 정책적으로 신규 석탄 발전허가를 제한 하는 화석연료발전 축소 노력을 확인할 수 있다. 정책으로 인해 석탄 발전 미세먼지 배출량이 2016년에는 30,679톤 → 2017년 26,952톤 → 2018년 22,869톤으로 저감되고 있음을 확인할 수 있다. 현재 2016년 대비 약 25%이상 감축했다.

셋째 에너지전환을 통해 에너지 신산업분야의 일자리 창출 등의 경제적 효과를 기대하고 있다.

위와 같이 화석연료 발전이 배제되고, 탈 원자력발전이 정책적으로 부각되면서 재생에너지 산업 및 연구개발 전반에 걸쳐 관심이 높아지고 있다.

균등화발전비용(Levelized Cost Of Electricity : LCOE)은 발전설비 수명기간동안 불규칙적으로 발생하는 모든 비용과 발전량을 화폐의 시간전 가치를 고려하여 일정 시점으로 할인하고 연도별로 균일하게 나타낸 단위 가격으로 정의 된다.

이는 발전설비 비용의 현재 가치를 반전향의 현재가치로 나누어 산출되며 발전소 단위, 전력시스템 단위 및 사회적 단위로 확대하여 계산이 가능하다.

< 균등화 발전비용 산정식 (예) >

$$LCOE = \frac{\text{초기투자비} + \sum_{t=1}^{\text{발전기수명기간}} \frac{(\text{운영유지비}_t + \text{연료비}_t)}{(1 + \text{할인율}_t)^t}}{\sum_{t=1}^{\text{발전기수명기간}} \frac{\text{발전량}_t}{(1 + \text{할인율}_t)^t}}$$

발전소 단위 비용 (기초적 LCOE 분석범위)	<ul style="list-style-type: none"> • 자본비용(초기투자비) • 연료비용 • 운영유지비용(고정비 및 변동비)
전력시스템 단위 비용	<ul style="list-style-type: none"> • Grid Cost : 망 비용(망 이용료 및 접속비용) • Balancing Cost : 계통 수급안정화 비용(예비력 비용) • Profile Cost : 백업설비 비용, 출력제한(Curtailment) 보상비용 등
사회적 단위 비용	<ul style="list-style-type: none"> • 온실가스 배출로 인한 사회적 비용 • 비-온실가스 오염 영향 • 자연경관 및 소음 영향 • 생태계 및 생물 다양성에 대한 영향 • 방사능 배출관련(원전사고 위험관련) 외부 비용 등

출처: 전력경제 REVIEW 2019.8.5

<그림3> LCOE 산정법

국내에서 신재생 발전의 LCOE를 낮추기 위해서 필요한 방향성을 다음과 같이 보고 있다. 연구개발을 통한 차세대 고효율 신재생에너지 발전 시스템의 개발과 상용화, 입지조건에 따라 면적의 영향을 최소화 받을 수 있는 발전 설비 시스템의 개발, 환경적 요소를 생각한 사회적 단위 비용 절감을 위한 연구개발, 발전설비의 공정 단순화와 저가 재료 등의 개발을 통한 발전단가 감소 등이 있다[1].

본 논문에서 연구하는 염료감응형 태양전지(dye sensitized

solar cell)가 가진 이점인 광투과성과 발전에 용이한 낮은 입사각도, 건물일체형태양광 발전시스템인 BIPV(Building Integrated Photovoltaic) 등에 적용으로 인해 위와 같은 조건을 만족하여 LCOE를 낮출 수 있다.

태양광발전에 사용되는 대부분의 전지는 규소찬인 실리콘 웨이퍼를 기반으로 하는 실리콘 태양전지가 차지하고 있다. 그리고 화합물 반도체 태양전지인 CIGS 박막 태양광 전지가 사용되어 지고 있으나 이는 기존 실리콘 태양광 모듈에 비해 발전효율은 15% 정도 낮지만 경량과 유연성으로 설치 가능한 곳이 많으며 형태의 자율성으로 최근 BIPV에 적용이 용이하다. 하지만 박막 태양전지의 주요성분인 유해 중금속인 카드뮴(Cd)이 향후 전지의 폐기에 따른 환경 오염 우려가 제기되고 있다. 태양전지에 대한 연구는 실리콘 태양전지의 효율과 사용수명 증가와 관련하여 많은 연구가 진행되었고, 차세대 태양전지인 페로브스카이트 등에 대한 상용화를 위해 많은 개발과 연구가 이루어지고 있는 실정이다.

본 논문에서 연구하는 염료감응형 태양전지는 실리콘 전지와 같은 효율적인 기능보다는 CIGS와 같은 유연성을 지닐 수 있으며 친환경적인 요소와 BIPV의 활용을 통해 심미적이고 인테리어적인 요소도 고려하며 설치의 유연성과 비상에너지, 제로에너지 건물의 요소로서의 연구개발을 통해 상용화 가능성을 앞당길 수 있을 것으로 보인다.

연구에서는 저온소성을 위해 TTIP를 첨가한 TiO_2 paste를 제조하여 첨가비율과 소성온도에 따라 DSSC의 효율특성과 함께 이를 이용하여 기존 substrate와 flexible substrate에 적용 후 그 특성을 측정하는 것을 목적으로 한다.



제 2 장 이론적 배경

2.1 태양전지의 개요 및 종류

1839년 물리학자 Edmond Becquerel은 태양전지의 작동원리인 태양광 효과의 발견으로 부터 시작되어 단결정 실리콘의 성장법 개발과 결정성 실리콘 태양전지가 개발되면서 본격적으로 실리콘 태양전지에 대한 연구개발이 진행되었다.

전기와 화학영역 등의 다양한 분야에서는 실리콘 태양전지에 대한 전기적 특성과 고효율, 발전의 안정성, 제작공정의 단순화와 의한 원가절감에 관련한 연구가 진행되어 왔으며, 추가적으로 고효율, 원료의 다변화를 통한 제조원가 절감을 목적으로 각종 유기, 무기 태양전지의 개발이 이루어져 왔다. 그림4에 태양전지의 다양한 분류에 따른 종류를 도식되었다. [2].



그림 4. 태양전지의 세대별 분류표



그림 5. 태양전지의 소재별 분류

일반적인 실리콘 태양전지 및 기타 태양전지는 태양에너지를 전기에너지로 변환할 목적으로 제작된다. 금속과 반도체의 접촉면 또는 반도체의 pn접합에 빛을 조사(照射)하여 광전효과에 따라 광기전력이 일어나는 것을 이용한 것이다.

PN접합(PN-junction)은 전기적 성질이 다른 N(negative)형의 반도체와 P(positive)형의 반도체를 접합시킨 구조를 하고 있으며 2개의 반도체 경계 부분이다. p형 반도체는 외부에서 입사된 광자에 의해 에너지 밴드의 가전대로 여기되며, 그 내부에는 전자(-)는 N형 반도체에, 정공(+)은 P형 반도체에 이르게 되며 P형 반도체와 N형 반도체 표면에 전극을 형성하여 전자를 외부 회로로 흐르게 하면 전류가 발생된다.

실리콘 태양전지는 그림 5에서와 같이 웨이퍼의 생성 시 결정의 종류인 단결정과 다 결정으로 2가지로 구분되며 단결정은 검은색, 다결정은 파란색으로 나타난다. 순도가 높은 단결정이 다결정에 비해 높은 효율 및 안정성을 가지지만 지속적인 연구와 개발로 다결정의 성능 역시 상승되고 있다.

그림4의 박막형 종류로 비정질 방식은 도포가 가능하다는 특징을 가진다. 생산원가가 낮아 단결정 또는 다결정 방식에 비해 생산비 절감이 가능하며 발전량은 다결정에 비해 효율이 낮지만 온도차에 따른 발전량의 저하가 결정질에 비해 낮아서 특수한 기온환경에서 효율적으로 사용되어 진다.

실리콘 박막으로 제작된 태양전지의 경우 태양 빛이 입사되었을 때 발생하는 내인성 손상률이 20%정도로 태양전지 내부에 빛을 잡아두는 가공기술 및 디바이스와 디자인에 대한 연

구가 필요한 부분이다.

화합물 반도체 태양전지는 그림5의 GaAs(갈륨비소), CIGS(구리 인듐 갈륨 셀레 나이드), CdTe(카드뮴 텔루라이드)와 같은 반도체 특성을 지니는 태양전지를 말하며. 보통 p형 반도체와 n형 반도체를 접합하여 제조한다. III-V족, GaAs계열은 성능과 내구력이 높고 생산원가가 높다. 이를 해결하기 위해 Fresnel Lens를 이용하여 빛을 집속시켜 사용한다. 제조 시 사파이어 재질 기판위에 증착시키며 이를 성장 시키는 방법으로 공정에서 열을 가하면 열팽창 정도 차이로 갈라짐의 문제가 발생한다. II-VI족 CdTe 태양전지는 환경에 유해한 카드뮴(CD)를 사용하나 제조시 사용되는 에너지가 낮고 성능이 좋아 화합물 반도체중 저가로서 대규모 발전에 이용되고 있다. 폐기시 환경문제에 따라 재생에너지로의 개선 연구가 필요하다고 본다. 그리고 CIGS소자는 구리 인듐 갈륨 셀레늄이 구성물로 다결정 실리콘 태양전지에 비해 적은 물질로도 빛을 잘 흡수하므로 박막화가 가능해 제조원가를 낮출 수 있지만 인듐과 갈륨의 수급이 낮아 상용화에는 문제가 있다.

유기 태양전지는 실리콘 태양전지 및 화합물 태양전지와는 반대로 유기물을 사용한 태양전지로 염료감응형 태양전지와 유기분자형 태양전지로 나눌 수 있다. 유기분자형 태양전지는 전자 도너(Electron donor) 특성과 전자 억셉터(Electron acceptor) 특성을 갖는 유기물들로 구성되어 있으며, 빛을 흡수하면 전자와 정공이 형성되는 여기자(exciton)가 도너와 억셉

터 계면으로 이동하여 전하가 분리되고, 전자는 억셉터로, 정공은 도너로 이동하여 광전류가 발생시키는 동작원리를 가진다. 그러나 여기자의 이동거리의 제약으로 초박막 형태로 제작되어야 하는 단점을 가진다. 본연구에서 사용한 염료감응형 태양전지의 경우 다음 장에 기술하였다. [11]

현재 가장 활발히 연구되고 있는 분야 중 페로브스카이트 (Perovskite) 태양전지의 페로브스카이트는 재료의 결정구조를 지칭하는 용어이며 CaTiO_3 과 같이 ABX_3 와 같은 형식의 결정구조를 가지는 재료의 단어이다. 그림6의 (a)의 A와 B는 양이온, X는 음이온으로 구성되며 면심입방체와 체심입방체가 혼합된 결정구조를 가지며 그 구조를 그림 6에 표시하였다..

흡광계수가 높은 페로브스카이트 태양전지는 입사된 태양 빛의 대부분을 전자 생성에 사용되게 된다.

그림6의 (b)의 MAPbI_3 는 페로브스카이트 태양전지에 사용되는 가장 널리 알려진 물질로 밴드갭이 약 1.55 eV로 태양광 이용이 용이하며 높은 유전상수로 인해 엑시톤 결합에너지가 50mV 이하로 낮아 빛을 받아 생성된 전하의 분리가 쉽다.

r,리고 대부분의 흡수영역에서 10000cm^{-1} 의 높은 흡광계수를 가져 박막에서도 충분히 빛을 이용할수 있으며 전하의 확산거리가 길어 생성된 광전류의 손실이 적으며 높은 개방전압으로 고효율이 용이하며 저렴한 소재로부터 합성이 가능하며 저온 소성이 가능한 태양전지를 제작할 수 있지만 소재 자체의 화학적 안정성이 나쁘다. 특히 온 또는 습도와 같은 외부의 환경에 큰영향을 받으며 공기와의 접촉에 의해 급속히 그 특성을

없이 이를 보완하기 위한 공정 등이 추가되어 상용화되지 못하고 있다. [10]

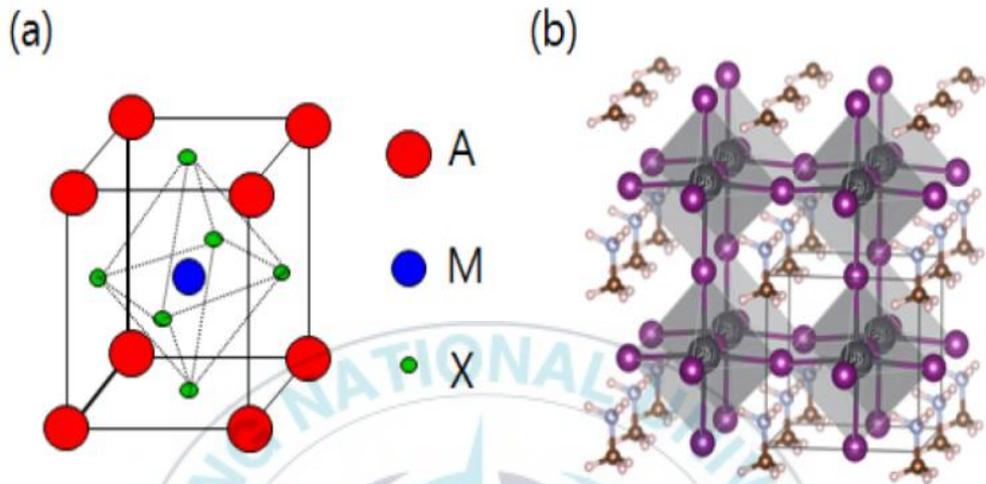


그림 6. (a) 페로브스카이트의 기본 결정구조와 (b) 고효율 태양전지에 사용되는 MAPbI₃

2.2 염료감응형 태양전지

2.2.1 염료감응형 태양전지 이론

2000년대부터 연구가 이루어지고 있는 전지인 염료감응형 태양전지는 식물의 광합성을 모방한 메커니즘을 가진다. 즉 식물의 광합성처럼 염료층이 빛을 흡수하여 전기에너지로 변환하는 방식이다. 연구에서 제시된 염료감응형 태양전지는 전도성 유리기관 사이에 다공성 반도체산화물을 박막형태로 증착하고 이에 염료분자를 흡착시켜 제작된다. 식물의 엽록체와 같이 빛을 흡수한 염료가 전자를 넘겨주면 전해질이 다시 염료에게 전자를 넘겨 환원하는 원리로 작동한다. 이는 식물이 광합성을 하여 영양소를 만드는 것처럼 염료분자에 입사된 태양광에 의해 전자기 여기 되어 발전한다.

염료 태양전지의 역사는 1960년 염료용액에 담긴 단결정 반도체를 이용한 실험이 최초로 실행되면서 부터이다. 분자가 전극표면에 단분자층으로 부착되었을 때 높은 효율이 측정되었으며, 광흡수의 경우 분자층의 두께가 얇고 일정할수록 효율이 좋다는 것을 확인하였다.

1976년 쓰보무라(Tshubomura) 연구팀이 Nature지를 통해 높은 다결정 ZnO 분말을사용한 연구회를 발표함으로써 큰 효율향상을 제시하였으며 이 방법으로 전극의 표면적은 큰 폭으로 증가시킬 수 있었다. 또한 산화·환원 전달 시스템이 효율

증대에 유리하게 작용한다는 것을 적용하여 효율을 1.5%로 증가시켰다.

1980년부터 스위스의 Gratzel교수 연구팀에 의해 발표된 고효율 염료감응형 태양전지의 개발을 통해 저가의 나노기공 반도체를 도전성을 가진 투명한 유리재질의 substrate 접착하여 Ru계의 염료와 전해질을 사용하는 현재 주로 연구되고 있는 DSSC의 기준이 마련하였다. 즉 TiO_2 나노 파우더를 도전성 Glass에 접착시킨 후, Ru계 염료 및 I^-/I_3^- 전해질을 사용하여 효율 10%의 최고효율을 지닌 전지를 1993년에 개발 하였으며 현재는 13%로 광전변환효율을 발전시키고 있다.

환경문제와 더불어 에너지문제가 이슈화되면서 친환경에너지인 태양광발전에 대한 인식이 많이 달라지고 있다. 실리콘 전지가 태양광발전 시장에서 대부분을 차지하고 있지만 여러 가지 문제가 발생하고 있다. 설치면적에 대한 문제로 국내에 대규모 발전을 위한 시설이 어려우며 이관리와 폐기시 일어나는 환경문제 등이 더욱 늘어나고 있다.

실리콘 전지의 문제점을 해결하고 대규모 발전보다는 국내 환경에 적용할 수 있는 즉 심미성을 고려한 BIPV로의 적용이 가능하며 좋은 광전 변화효율 가진 차세대 태양전지 중 하나인 염료감응형 태양전지의 공정개선, 재료 다양화를 통한 친환경적 제조, 효율 및 안정성 개선 등에 대한 지속적 연구가 필요하다. 특히 반도체 공정의 확산으로 진공증착 장비 등의 가격하락과 Ru 계열의 염료와 비교하여 낮은 가격 및 재료확보의 안정성을 가진 오가닉 염료의 개발이 차세대 전지로서의 경쟁력을 가질 수 있다.

2.2.2 염료감응형 태양전지의 동작원리

염료감응형 태양전지(DSSC)의 동작 메커니즘은 태양에서 입사되는 광에너지의 약 44%의 가시광장영역의 광을 효과적으로 이용하기 위하여 선택적인 광흡수대 영역을 가지는 태양광 흡수용 염료고분자와 전자의 이동을 담당하는 넓은 밴드갭(Band Gap:3.2 eV) 반도체인 p형 반도체 역할을 하는 TiO_2 , p형 반도체 역할을 하는 전해질과 촉매 상대전극과 태양광 투과용 투명 전극을 기본으로 그 역할이 분리되어 있다. 일반적인 태양전지에 비해 간단한 소자 구성과 동작 원리를 가지며 제작 방법이 간편하고 고가의 장비가 필요하지 않다. 또한 적용하는 소재의 다양성을 가지며 친환경적이다.

염료감응형 태양전지의 동작 메커니즘을 그림7에 표시하였다. 태양광이 입사되면 유리 등의 투명 기판을 통해 광전극에 도달하게 될 때 투명전극을 통과한 광자는 TiO_2 에 흡착된 염료에 흡수된다. 광자의 흡수로 염료는 전자를 여기 시키며, 여기된 전자는 염료의 HOMO(highest occupied molecular orbital) 레벨에서 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital) 레벨로 전환되어 전자가 여기 되는 것이다. 그리고 밴드 갭에 의해 염료에서 TiO_2 로 여기된 전자가 이동하게 되고 투명전극인 일반적으로 사용되어지는 FTO, ITO와 같은 전극을 통해 상대전극에 도달하여 전해질의 산화·환원 반응을 통해 다시 염료로 이동되는 폐회로를 구성하여 동작하게 되는 것이다 [11].

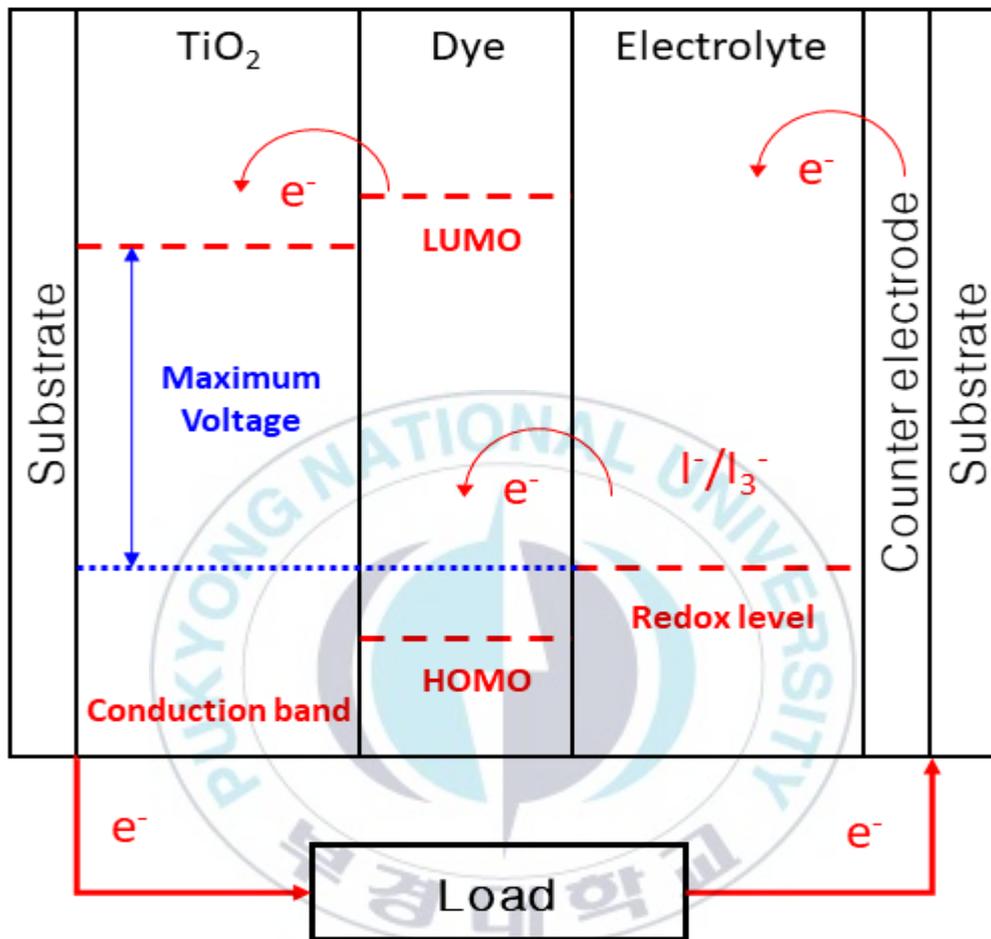


그림 7. 염료감응형 태양전자의 동작원리

태양광의 광자를 흡수한 염료는 ground state(바닥상태)에서 excited state(들뜬상태)로 전이(transition) 한다. 그 후 nonthermalized singlet excited state(열화 되지 않은 단일항 들뜬상태) 에서 반도체 전도띠로 전자주입 되는 과정과 내부

vibrational relaxation(진동-이완) 과정을 거쳐 triplet excited state(삼중 들뜬 상태)로 이동된 열화전자(thermalized electron)가 주입되는 과정이다. 이때 TiO_2 로 투입되는 시간은 femto second 내지 picosecond 로 빠른 속도이다. 산화된 염료는 수 nanosecond 내에 다시 재생되며, 여기서 염료에서 여기된 전자가 surface state(표면상태)를 거쳐 TiO_2 로 이동하는 시간은 전해질을 통해 재결합되는(recombination 또는 back reaction) 속도보다 짧아야 한다. 만일 전해질을 통한 전자-정공의 재결합 반응이 더 빠를 경우 효율에 큰 영향을 미칠 수 있다. 하지만 전해질을 통한 재결합 속도는 마이크로에서 밀리초로 TiO_2 로 투입되는 시간인 femto second 내지 picosecond 보다 느려 광전자에 의해 여기된 전자의 전달이 대부분이기 때문에 높은 광전 에너지 변환효율을 나타낼 수 있다[11].

2.3 DSSC의 구조 및 구성

일반적인 염료감응형 태양전지의 구조는 앞에서 기술했던 것과 같이 기판, 염료, 광전극, 상대전극, 전해질로 구성되어 있으며 투명기판 위 투명전극이 코팅되어 있다. 이는 나노입자로 구성된 다공질 TiO_2 와 TiO_2 입자의 표면에 단분자층으로 흡착된 염료분자와 두 전극 사이를 채우고 있는 전해질로 구성되어 있다. 그림8에 표시 하였으며 각 구성의 특징에 대해 설명한다.

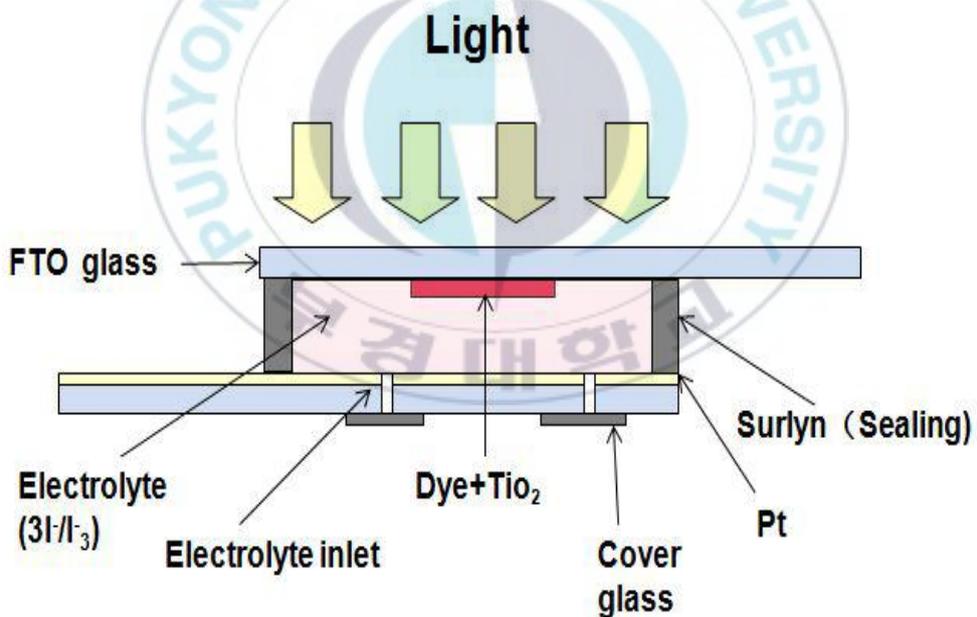


그림 8. 염료감응형 태양전지의 구조

2.3.1 투명전극

염료감응형 태양전지의 전도성 기판의 선택은 공법을 결정하고 그에 따라 성능 및 수명과 제조비용을 결정한다. 기판은 높은 전도도와 가시광선 영역에서 투과도(투명도)가 좋으며 산소, 수분 투과도가 작을수록 이상적인 기판이라 할 수 있다. 일반적으로 사용되어 지고 있는 기판은 염료에 태양광이 조사되기 위해 투명한 전극이 사용되며 대표적인 투명전극으로는 FTO(Fluorine-doped Tin Oxide, $\text{SnO}_2:\text{F}$), ITO(Indium Tin Oxide, $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Sn}$), AZO(Aluminium doped ZincOxide)등 사용되어지고 있다. 염료감응형 태양전지에서 광전극을 형성하기 위해서는 나노입자 산화물을 박막형태로 제작된다. 이 공정은 $400\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ 의 고온의 열처리가 필요하다. 따라서 투명 전도성 기판의 고온공정에 대한 안정도를 고려할 필요가 있다. 하지만 염료감응형 태양전지가 일반 태양전지와 차별화되는 투명성, 심미성 등을 고려하여 BIPV에 적용하기 위해서는 유연성이 적용된 디바이스 제작이 필요하며 이를 위해 유연성 전극이 필요로 한다. 유연성이 적용된 태양기판은 기존의 유기 기판을 기반으로 한 태양전지에 비해 DSSC는 제조 공정상 저온공정이 적용되기 때문에 유연기판을 사용할 경우 roll-to-roll (R2R) 대량 생산이 가능하여 생산비용이 감소할 것이다. 이러한 유연성 투명전극의 경우 온도 안정성이 낮기 때문에 저온으로 광전극을 형성할 수 있는 기술이 필요하다 [6].

2.3.2 광전극

금속을 기판으로 하는 PE는 고온의 소성 공정이 적용 가능하므로 입자가 연결이 좋은 고품질의 TiO₂ 전극을 생산하는데 유리하다. 그러나 CE로부터 광이 입사되어야 하므로 전해질 층과 촉매층에 의한 광손실이 불가피하다. 플라스틱 기판을 적용한 DSSC의 가장 핵심 기술은 저온공법이다. 그 이유는 플라스틱 기판이 고온(400~500°C)에 의해 변형되는 문제가 발생하기 때문이다. 또한 고온의 소성 과정을 거치지 않고 저온에서 전극을 제작하는 경우, 기존 TiO₂ Paste에 첨가된 바인더 및 유기물들이 제거되지 않아 TiO₂ 입자 사이의 연결특성이 저하되어 전자 전달에 어려움이 있고 TiO₂ 전극이 기판으로부터 쉽게 분리된다. 그러므로 바인더 및 유기물들이 첨가되지 않은 TiO₂ 입자 사이의 연결이 강한 고점도 TiO₂ Paste 개발이 중요하다.[12]

광전극은 염료를 흡착할 수 있는 전극 소재는 밴드 갭 에너지가 큰 반도체 나노결정(직경 15~20 nm) 산화물을 주로 사용하며 나노 입자 산화물의 전자구조 및 표면 특성 변화는 광전류와 전압에 모두 영향을 미칠 수 있다. 나노 크기의 물질을 사용하는 이유는 입자 크기 감소에 의한 비표면적 증가로 보다 많은 양의 염료분자를 흡착시킬 수 있기 때문이다 [7].

일반적으로 염료감응형 태양전지의 출력전압은 반도체 산화물 입자로 주입된 전자의 페르미 준위와 전해질의 산화/환원 준위와의 차이에 의해서 결정된다. 따라서 높은 출력전압을 얻기 위해서는 높은 에너지의 전도대(Conduction Band)를 갖는

반도체 산화물을 사용하는 것이 바람직하다. 하지만, 염료에서의 전자 주입이 용이하게 이루어져야 하기 때문에 반도체의 전도띠 에너지는 염료의 LUMO보다 낮아야 한다. 현재 가장 많이 사용되는 산화물은 TiO_2 로서 루테늄계 염료의 LUMO 에너지보다 약 0.2 eV 낮은 곳에 TiO_2 전도띠에너지가 위치하고 있다.

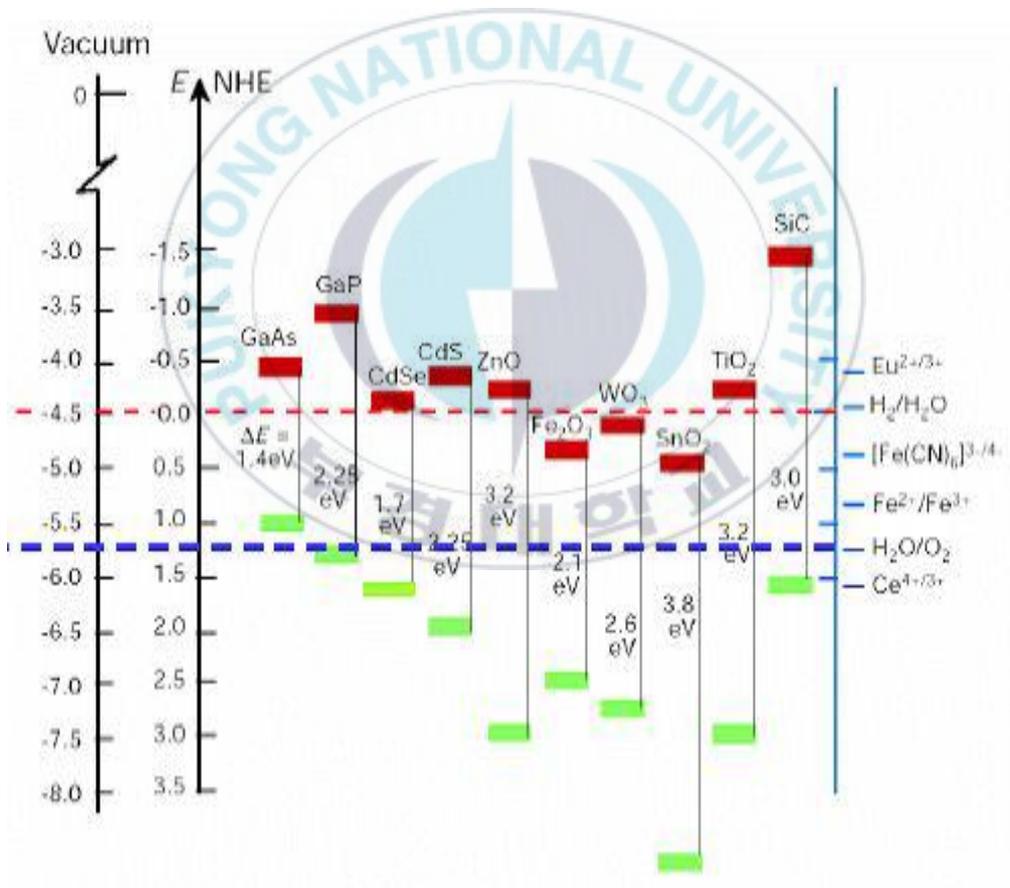


그림 9. 반도체의 전도띠 에너지

2.3.3 염료

염료가 염료감응형 태양전지용으로서 갖추어야 할 조건은 첫째 가시광선 전영역의 빛을 흡수할 수 있고, 둘째 광계수가 높아야 하며, 셋째 나노산화물 표면과 견고한 화학결합을 이루고 있어야 하며, 넷째 열 및 화학적 안정성을 지니고 있어야 한다. 염료의 LUMO는 특히 전하분리 나노산화물 소재의 conduction band 에너지 보다 높게 설계해야 한다. 염료감응형 태양전지에 사용되는 염료는 유기금속화합물, 유기화합물 그리고 InP, CdSe 등의 양자점 무기화합물이 알려져 있다. 지금까지 알려진 염료 중에는 루테튬계 유기금속화합물이 가장 우수한 것으로 보고되고 있다 [8].

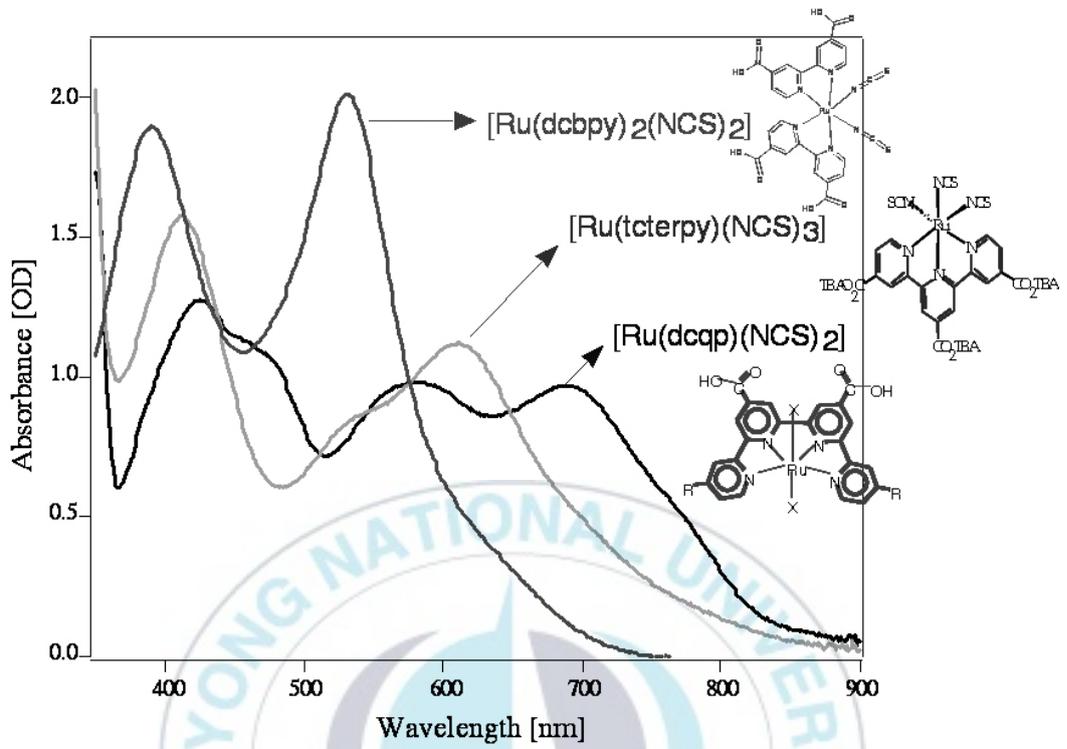


그림 10. 리간드에 따른 루테늄 염료의 가시광 흡수 파장의 변화

2.3.4 전해질

전해질은 염료감응형 태양전지의 경우 I⁻/I³⁻와 같이 산화-환원 종으로 구성되어 있으며, I⁻ 이온의 source로는 LiI, NaI, 알칼암모니움 요오드 또는 이미다졸리움 요오드 등이 사용되며, I³⁻ 이온은 I₂를 용매에 녹여 생성시킨다. 전해질의 매질은 acetonitrile과 같은 액체 또는 PVdF와 같은 고분자가 사용될 수 있다. I⁻는 염료분자에 전자를 제공하는 역할을 하고 산화된 I³⁻는 대전극에 도달한 전자를 받아 다시 I⁻로 환원된다 [9]. 액체형의 경우 산화-환원 이온 종이 매질 내에서 신속하게 움직여 염료의 재생을 원활하게 도와주기 때문에 높은 에너지변환 효율이 가능하지만, 전극간의 접합이 완벽하지 못할 경우 누액의 문제를 가지고 있다. 반면 고분자를 매질로 채택할 경우에는 누액의 염려는 없지만 산화-환원 종의 움직임이 둔화되어 에너지변환 효율에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 따라서 고분자 전해질을 사용할 경우에는 산화-환원 이온 종이 매질 내에서 신속하게 전달될 수 있도록 설계하는 것이 필요하다.

2.3.5. TTIP가 첨가된 TiO₂ paste

염료감응형 태양전지에서 광전극은 광전변환에서 중요한 역할을 수행하며, 사용된 n형 전이금속 산화물이 입자크기, 형상, 결정성, 표면상태 및 분산상태 등이 DSSC의 효율에 큰 영향을 미친다[1]. 그러므로 TiO₂ 층 형성은 염료와 함께 DSSC의 효율을 결정짓는 요소 중에 하나이다.

최근 flexible device에 대한 요구가 지속적으로 증가되면서 염료감응형 태양전지의 제작 시 유연기판을 적용하기 위한 저온소성용 TiO_2 paste 제조에 대한 연구가 필요해지고 있다.

광전극의 저온소성 제작을 위하여 가수분해, 축합반응을 통해 TiO_2 입자를 형성하며, TiO_2 의 제조 시 전구체로 많이 활용되는 티타늄 이소프로폭사이드(Titanium isopropoxide, 이하 TTIP)를 binder로 사용가능하다. TTIP의 구조를 그림11에 표시하였다.

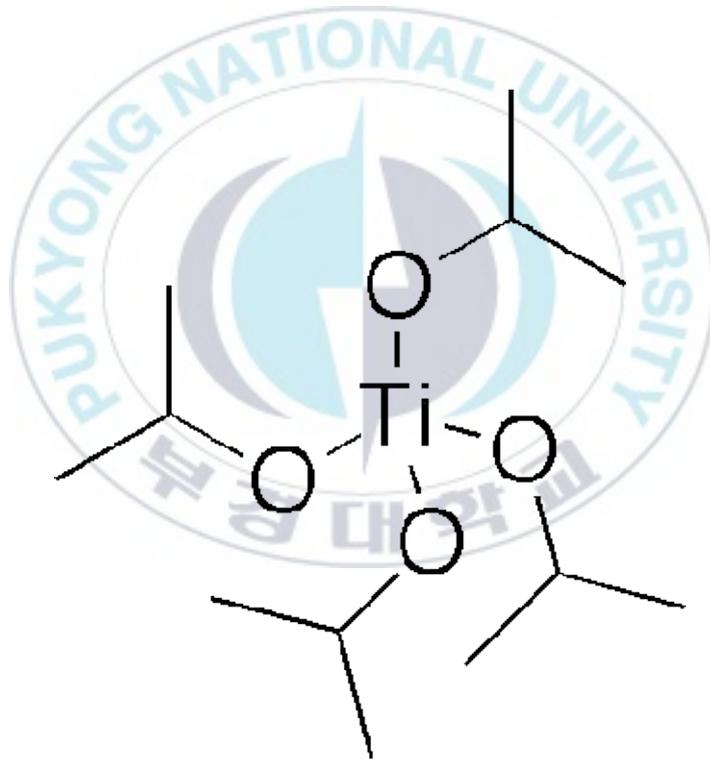


그림 11. TTIP의 구조

2.4. DSSC 제작

2.4.1 티타늄이소프로폭사이드(Titanium isopropoxide)를 첨가한 TiO_2 paste 제조

저온에서 TiO_2 를 소성할 경우 고온에서 소성할 때와 달리 입자간의 연결이 좋지 않게 되어 전자의 흐름을 방해한다[14]

저온 소성으로도 전자의 흐름의 원활히 하기 위해 TiO_2 paste의 유기바인더를 제거한 후 TiO_2 입자간의 연결성을 유지시켜 전자의 흐름을 향상시키기 위한 전구체물질인 티타늄이소프로폭사이드(Titanium isopropoxide)인 TTIP를 TiO_2 powder에 0.1:1부터 0.9:1까지 TTIP의 몰비율을 달리하여 적용하였다.

TiO_2 powder(P25,sigmaaldrich)를 분산시키기 위해 TiO_2 powder 1g와 일정량의 D.I water를 함께 소닉케이트로 분산시킨 후 TTIP와 TiO_2 를 몰비율에 따라 아래 표1과 같이 5가지의 비율로 나누어 각각을 마그네틱 교반기에서 3시간 동안 교반하여 제작하였다.

표 1. TiO₂ 페이스트에 사용 된 TTIP의 5가지 몰비.

Mark	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
TTIP:TiO ₂	0.1:1	0.3:1	0.5:1	0.7:1	0.9:1
TTIP(g)	1.8	5.4	9	12.6	16.2
TiO ₂ (g)	5	5	5	5	5

2.4.2 TiO₂ 광전극 제작

광전극 제작에는 FTO glass (TEC 8, Pilkington)기판을 사용하였다. FTO glass를 기판은 기타 변수에 대한 안정성이 보장된 기존 연구에서와 같은 환경에서 TiO₂ paste로 저온소성 방식으로 형성된 광전극을 이용한 염료감응형 태양전지를 제작 후 그 특성을 측정하여 기존 연구 결과의 효율특성 및 전기적인 특성을 비교 시 정확한 비교 및 평가가 가능하다.

준비된 기판을 acetone, ethanol로 각 5분 동안 초음파 세척하여 이물질을 제거하였다. FTO glass에 30 μ m tape(PS25 ,

Coretech)로 0.25cm^2 의 활성영역을 제외하고 Tape casting하였다. 이후 TiO_2 paste를 균일 두께로 도포하기 위해 닥터 블레이드 방식으로 FTO glass를 도포하였다. 도포한 FTO glass를 열처리를 위하여 건식오븐에서 120°C 의 온도로 30분 가까이 열처리하였다. paste의 안정적인 냉각을 위해 오븐 내에서 2시간동안 서서히 냉각하였다.

TiO_2 paste로 도포된 FTO glass를 N719염료 (cis-dithiocyanato-bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II) bis(tetrabutyl ammonium) 0.5mMol)에 24시간 함침하여 염료를 흡착한 후 ethanol을 사용하여 흡착된 여분의 염료를 제거하여 제작하였다.

2.4.3 연료감응형 전지(DSSC)제작

상대전극(counter electrode) 제작으로 사용된 기판은 광전극(photoelectrode) 제작에서와 동일한 FTO glass를 사용하였다. FTO glass에 전해질(electrolyte)주입을 위한 주입구를 glass용 소형드릴을 통해 천공하였다. 상대전극 제작을 위해 FTO glass를 앞선 광전극 제작에서와 같은 방식으로 acetone, ethanol로 초음파 세척된 FTO glass에 Tape casting하였다. 이후 도포공 역시 앞선 방식과 같은 닥터 블레이드 방식으로 Pt paste(Platisol T, Solaronix)를 도포하였다. Pt paste로 도포된 glass를 전기로에서 450°C 의 온도로 10분 동안 소성한 후

기판을 전기로 내에서 상온까지 안전하게 냉각시켜 Pt 상대전극을 제작하였다.

이와 같이 제작된 광전극과 상대전극 두 전극기판의 결합을 위해 surlyn film (Meltonix, Solaronix)을 광전극 기판의 활성 영역에 맞추어 가장 자리에 위치시켜 고정하였다. Surlyn film 이 고정된 광전극 기판 위에 상대전극 기판의 전해질 주입구의 위치가 surlyn film의 내부를 벗어나지 않도록 상대전극 기판을 정렬하여 클램프로 고정하였다. 고정된 두 기판을 hot plate 온도 120°C에서 3분 동안 가열하여 surlyn film의 접착특성을 이용해 두 기판을 결합하였다. 결합된 두 기판은 상온까지 냉각 후 주입구를 통해 전해질 (acetonitrile base electrolyte 0.1M LiI, 0.6M DMPII, 0.05M I₂, 0.5 M TBP)을 일정량 주입하고 주입구를 Taping 밀봉하여 염료감응형 전지를 완성하였다. DSSC 제조 공정은 그림 12에 표시하였다.

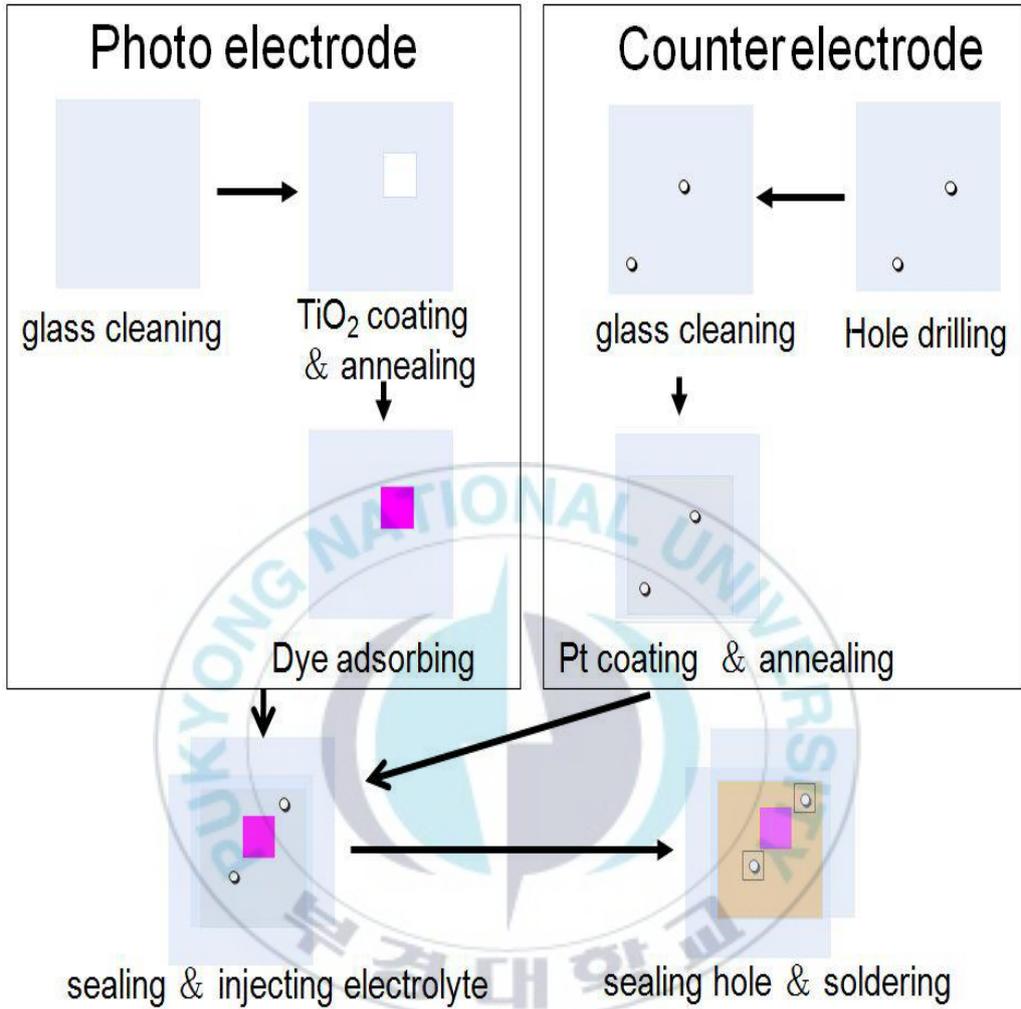


그림 12. DSSC의 제조 공정

2.4.4 Flexible substrate 염료감응형 태양전지(DSSC)제작

본 연구에서는 일반적인 FTO glass로 제작된 DSSC와 두 가지 Flexible substrate 를 비교하여 실험을 진행하였다.

Ti foil과 ITO 필름을 이용하였으며, 실험의 구조는 그림과 같이 구성되어있다.

Ti foil을 기판으로 사용하였을 경우 광전극이 불투명하여, 기존(FTO glass) 또는 ITO 필름을 사용하였을 때와 반대로 상대전극 방향에서 태양광을 입사시켜 발전효율을 측정하여야 한다.

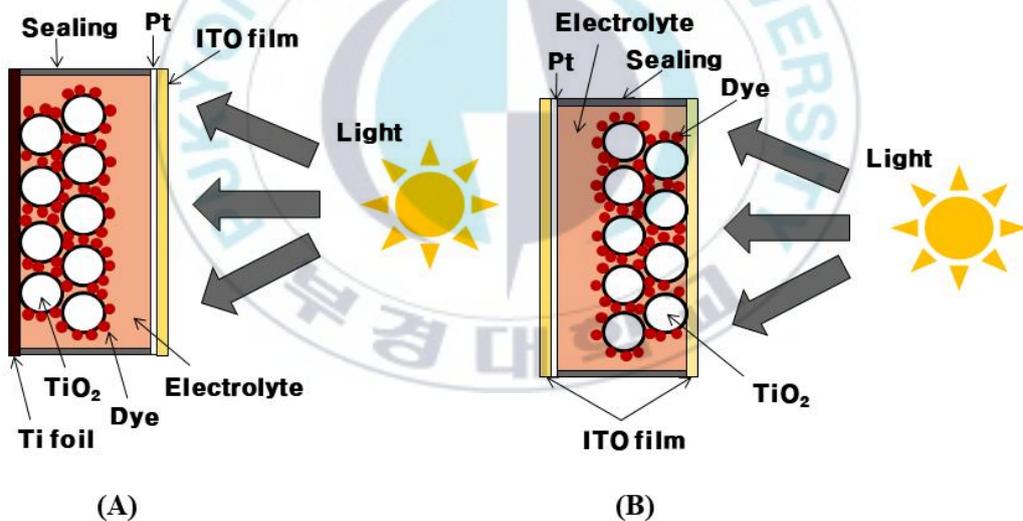


그림 13. Flexible substrate 염료감응형 태양전지의 제작 구조

(A) Ti foil substrate (b) ITO film substrate

제3장 실험결과

3.1 저온소성으로 제작된 TiO_2 광전극의 특성

TTIP를 0.5 mol 비율로 첨가하여 저온 소성으로 제작된 광전극의 특성을 확인하기 위하여 측정된 XRD 결과를 그림A에 나타내었다.

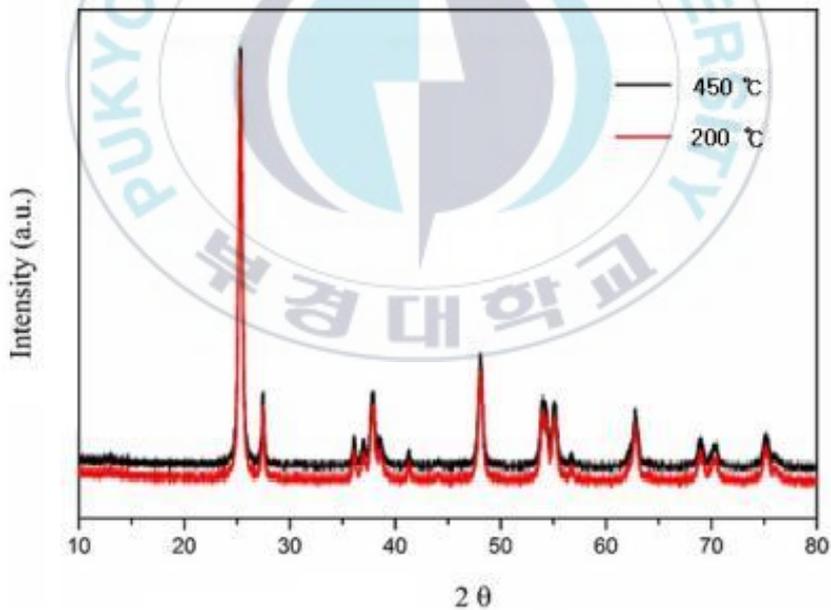


그림 14. TiO_2 paste를 이용해 450 °C로 소성한 TiO_2 layer와 TTIP 0.5 mol 비율로 200 °C로 소성하여 제작된 TiO_2 later의 XRD 결과

기존실험에서 TTIP의 첨가 시 mol 비율에 따라 TiO₂ layer 상의 TiO₂ 결정성을 보면 25.3° 근방에서 cps값이 mol 비율이 증가할수록 감소함을 보였으며, 0.5 mol 이후 급격히 감소하였다. 이와 상반되게 37.7° 근방에서는 mol 비율이 증가할수록 증가함을 보였다. TTIP를 0.9 mol 첨가시 Titanium Oxide가 추가로 검출되었으며, 37.7° 근방에서 TiO₂ Anatase 상이 가장 높게 나타났지만 25.3° 근방에서 cps값이 850으로 가장 낮아 결정성에 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

cps 값은 2-θ에서 나타내는 물질의 양과 결정성이 증가할수록 높아져, 결정성 분석의 척도임을 감안할 때 0.5 mol에서 TiO₂ 결정성의 안정성이 확보되었음을 확인하였으며, 이는 기존실험에서 DSSC 단위 셀을 제작하여 그 결과로 확인하였다. 측정결과를 표 2와 그림 15에 나타내었다.

표 2. TTIP mol 비율에 따른 DSSC 효율측정 결과

Additive amount	0.1 mol	0.3 mol	0.5 mol	0.7 mol	0.9 mol
V _{oc} (V)	0.749	0.754	0.771	0.760	0.743
J _{sc} (mA/cm ²)	7.294	8.402	8.572	8.270	6.891
Fill Factor (%)	61.438	61.229	62.617	61.322	61.883
Eiffciency (%)	3.358	3.881	4.138	3.371	3.169

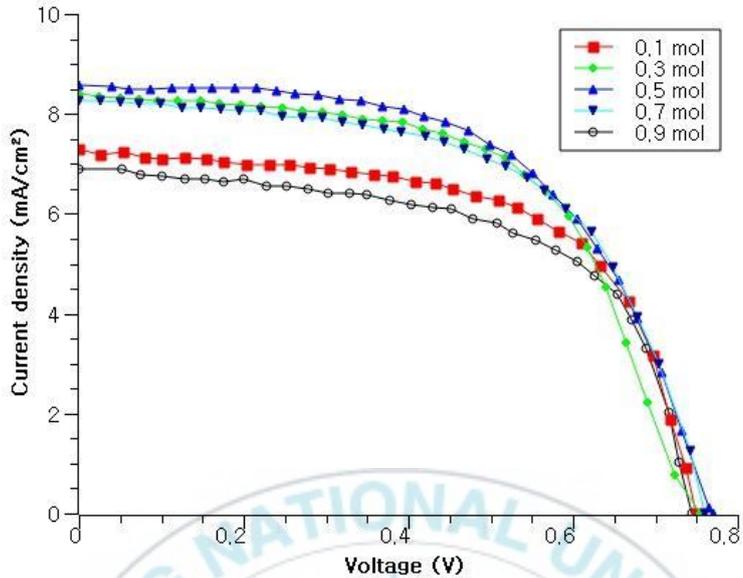


그림 15. TTIP 첨가량을 달리하여 형성된 광전극으로 제작된 DSSC의 J-V curve

표 2와 그림 15의 결과에서와 같이 TTIP의 첨가량이 0.5 mol일 때 각각의 전기적 특성이 가장 높게 측정되었으며, 그 결과 효율이 가장 높게 나타났다. 개방전압 및 단락전류밀도 및 최대효율에서의 최대전류 값이 0.5 mol에서 가장 높게 나타났으며, 최대전압 값은 mol 비율이 증가할수록 증가함을 보였다. 하지만 TTIP 0.9 mol 첨가 시 단락전류밀도 값이 대폭 하락하여 전체적인 광효율의 하락이 나타났음을 보인다.

그림 A에서 0.5 mol의 비율도 TTIP를 첨가한 TiO₂ layer와 기존 paste를 이용하여 제작된 TiO₂ layer의 XRD 결과에서 25.3° 근방과 37.7° 근방의 값이 거의 동일하게 나타나 flexible DSSC의 효율결과에서 광전극의 특성은 배제되었다.

3.2 ITO film substrate DSSC의 특성 결과

ITO film을 substrate로 하여 제작된 DSSC의 J-V curve 및 효율을 그림 16과 표 3에 각각 나타내었다.

기존 FTO glass에 저온소성 방식으로 제작한 (A)와 달리 (B), (C)는 ITO film에 TiO_2 를 스크린프린팅 방식으로 도포하고 ITO film의 내열 최고온도 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 와 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 각각 소성하여 제작하였다.

실험결과 ITO film substrate를 사용하여 제작된 DSSC가 전체적으로 낮은 전기적 특성을 보였으며, 효율 또한 낮게 나타났다. 기존 FTO glass에서 저온으로 광전극을 형성하여 제작된 (A)의 경우 0.771 V 의 개방전압과 8.572 mA/cm^2 의 단락전류밀도, 62.617% 의 fill factor를 보였으면 최종적으로 4.138% 의 광효율을 보였다. 하지만 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 로 소성한 (B)의 경우 낮은 결과치를 보였으며, 특히 fill factor의 경우 47.988% 로 가장 낮게 나타났다. 이는 최대전압과 최대전류가 높은 값을 가지고 있지만 실제 태양전지의 구동에서 셀지 지니고 있는 효율 기대치를 충분히 도출하지 못함을 의미한다. 그러므로 광전극이 형성은 되었지만 전하의 이동이 제대로 이루어지지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 계면에서의 전하 이동저항과 재조합 저항이 큰 것으로서 느린 홀 생성과 수송 및 전자-전공의 재조합 속도가 빨라짐에 기인한 것으로 볼 수 있다.

이와 비교하여 120 °C로 소성하여 제작된 (C)에서는 제일 낮은 개방전압을 보였으며, 가장 낮은 광효율 또한 나타났다. 이는 TiO₂ 층이 완전 소성되어 형성되지 못한 것에 기인한 것으로 보이며 이는 밴드갭의 특성이 명확히 나타나지 않아 낮은 개방전압 및 최대전압을 나타낸 것으로 보인다. 이와 반대로 (B)와 비교하여 높은 전류밀도는 TTIP의 TiO₂로의 전환이 적게 이루어져 TiO₂ nano particle에 부착된 TTIP를 통해 전하의 이동이 조금 더 활발히 이루어지며, 이를 통해 TCO와의 계면에서의 전하의 이동이 증가한 데 기인한 것으로 보인다.

ITO film을 substrate로 하여 제작된 DSSC의 효율 및 전기적 특성을 살펴본 결과 더 낮은 온도에서 광전극을 안정적으로 형성한다면 더 좋은 효율을 기대할 수 있을 것으로 보이며, 이는 기존 sputtering 방식 및 이를 포함한 roll to roll 방식과 비교하여 낮은 단가 및 단순한 process로 제작이 가능할 것으로 판단된다.

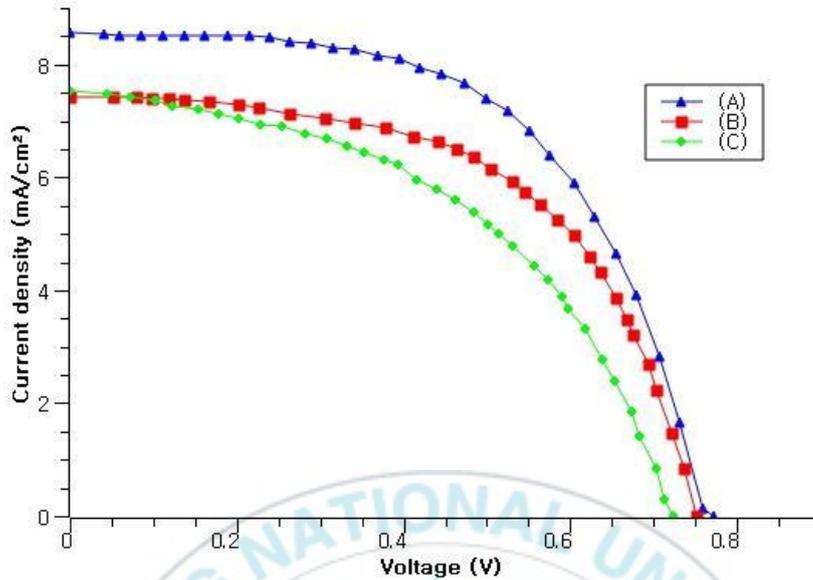


그림 16. DSSC J-V curve (A) FTO glass / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (B) ITO film / TTIP 0.5 mol / 150 °C, (C) ITO film / TTIP 0.5 mol / 120 °C,

표 3. DSSC 효율특성 (A) FTO glass / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (B) ITO film / TTIP 0.5 mol / 150 °C, (C) ITO film / TTIP 0.5 mol / 120 °C,

Mark	V_{OC} (V)	J_{SC} (mA/cm ²)	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
(A)	0.771	8.572	62.617	4.138
(B)	0.751	7.429	47.988	3.141
(C)	0.722	7.524	56.228	2.617

3.3 Ti foil substrate DSSC의 특성 결과

Ti foil을 substrate로 하여 제작된 DSSC의 J-V curve 및 효율을 그림 17과 표 4에 각각 나타내었다.

기존 FTO glass에 저온소성 방식으로 제작한 (A)와 달리 (B), Ti foil에 TTIP가 0.5 mol로 첨가된 저온소성용 TiO_2 paste를 스크린프린팅 방식으로 도포하고 200 °C에서 각각 소성하여 제작하였으며, (C)는 (B)와 같이 Ti foil에 TiO_2 paste를 스크린프린팅 방식으로 도포하였지만, 고온 소성용 paste를 사용하여 450 °C의 온도에서 소성하여 제작하였다.

실험결과 Ti foil substrate를 사용하여 제작된 DSSC가 전체적으로 높은 전기적 특성을 보였으며, 효율 또한 높게 나타났다. 기존 FTO glass에서 저온으로 광전극을 형성하여 제작된 (A)의 경우 0.771 V의 개방전압과 8.572 mA/cm^2 의 단락전류밀도, 62.617 %의 fill factor를 보였으면 최종적으로 4.138 %의 광효율을 보였다. Ti foil에 저온 소성방식으로 통해 광전극을 형성한 (B)의 경우 0.772 V의 개방전압을 보여 (A)와 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 단락전류밀도는 8.717 mA/cm^2 로 높게 측정되었고 fill factor의 경우도 1 % 정도 상승한 값을 보여 전체적으로 4.301 %의 효율을 보였다.

이와 비교하여 고온 소성용 TiO_2 paste를 이용하여 광전극을 형성하여 제작된 (C)에서는 가장 높은 전기적 효율특성이 나타났다. 개방전압은 0.778 V로 크지는 않으나 조금 상승하였으며, 단락전류밀도의 경우 9.319 mA/cm^2 로 큰 상승을 보였으며, fill factor는 67.402 %로 또한 크게

증가하였다. 이에 기인하여 광효율 역시 4.893 %로 가장 높게 측정되었다.

실제 Ti foil을 substrate로 사용하였을 시 태양광의 입사방면이 광전극 방향이 아닌 상대전극 방향으로 입사되어 이로 인한 문제로 광효율에 영향을 미칠 것으로 예상되었으나, 실제 결과는 이러한 문제보다 상대적으로 낮은 전하의 이동저항으로 상대전극으로 태양광이 입사되었을 때 증가될 수 있는 재결합 저항의 증대보다 더 큰 효과로 나타났다고 보여진다.

또한 Ti foil을 substrate로 사용하였을 시 Ti foil과 TiO_2 층의 계면간의 결합 구조적 안정성으로 전하이동이 증대되며, TCO substrate와 비교하여 높은 금속전도성을 통해 전하의 이동 증대가 나타났다고 판단 할 수 있다.

Ti foil을 substrate로 사용하여 DSSC를 제작하였을 경우 TCO 전극 즉 투명전극을 사용하였을 때와 비교하여 높은 전기적 특성을 얻을 수는 있으나, DSSC의 장점으로 여겨지는 투명성 및 심미성의 저하가 발생한다. 이러한 점에서 금속성 광전극의 사용에 따른 심미적 감소와 성능적 개선을 함께 고려해야 할 것으로 보인다.

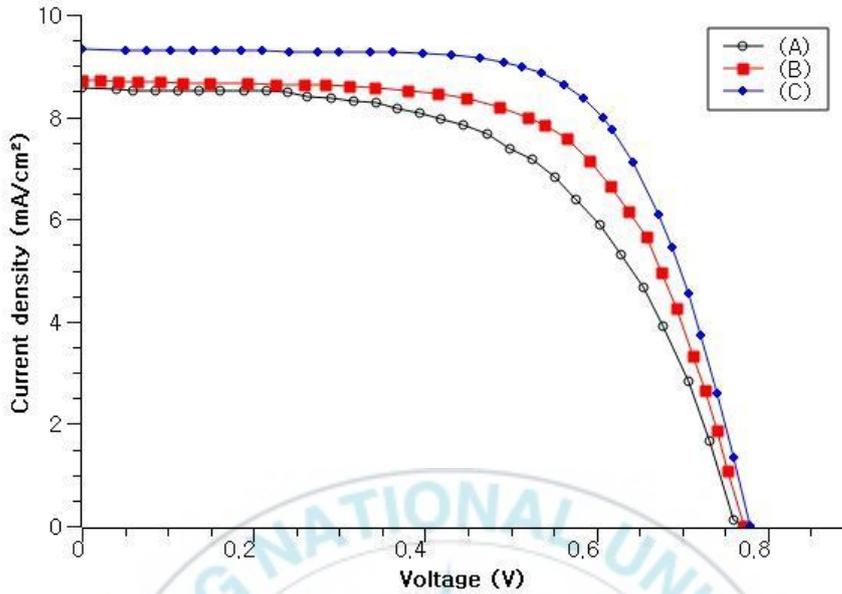


그림 17. DSSC J-V curve (A) FTO glass / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (B) Ti foil / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (C) Ti foil / TiO₂ paste / 450 °C

표 4. DSSC 효율특성 (A) FTO glass / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (B) Ti foil / TTIP 0.5 mol / 200 °C, (C) Ti foil / TiO₂ paste / 450 °C

Mark	V _{OC} (V)	J _{SC} (mA/cm ²)	Fill Factor (%)	Eifficiency (%)
(A)	0.771	8.572	62.617	4.138
(B)	0.772	8.717	63.726	4.301
(C)	0.778	9.319	67.402	4.893

제 4 장 결 론

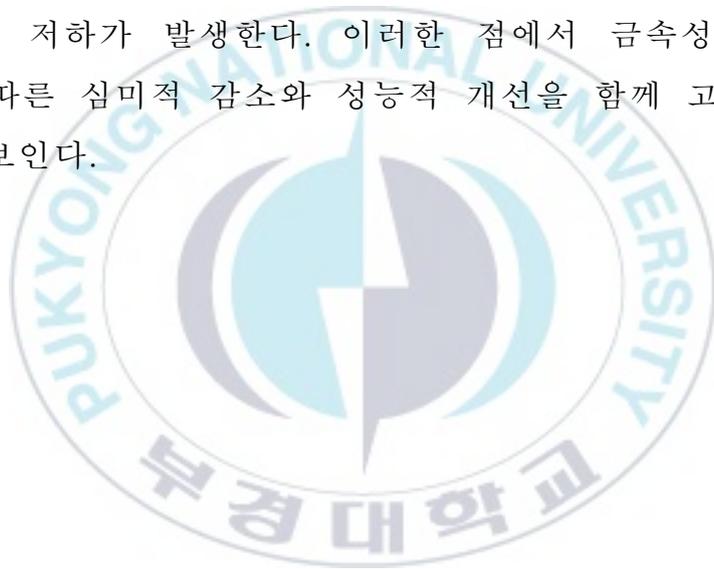
본 연구에서 기존 TTIP를 첨가한 저온소성용 TiO_2 paste를 제조하여 제작한 DSSC의 효율특성과 함께 이를 이용하여 각각의 substrate에 적용 후 그 특성을 측정하였다.

기존 FTO glass에 저온소성용 TiO_2 paste를 적용한 결과 TTIP 0.5 mol에서 가장 높은 4.138 %의 효율을 보였으며, 이후 실험에서 동일한 0.5 mol의 TTIP가 첨가된 TiO_2 paste를 사용하여 실험하였다.

ITO film을 substrate로 하여 DSSC를 제작 시 ITO film의 내열성의 한계에 의해 FTO glass와 비교하여 상대적으로 낮은 결과 값을 보였다. 이는 전하 이동저항의 증가에 기인한 것으로 보인다. ITO film을 substrate로 하여 제작된 DSSC의 효율 및 전기적 특성을 살펴본 결과 완전한 flexible 형태 및 심미성을 유지하며, 태양전지의 성능을 확보하기 위해서는 더 낮은 온도에서의 광전극 형성이 안정적으로 이루어지는 것이 필요하다고 판단된다. 이러한 문제점이 해결되면 기존 sputtering 방식 및 이를 포함한 roll to roll 방식과 비교하여 낮은 단가 및 단순한 process로 제작이 가능할 것이다.

Ti foil을 substrate로 하여 제작된 DSSC의 전기적 특성은 FTO glass를 substrate로 사용한 DSSC와 비교하여 높게 나타났다. 개방전압은 에너지 밴드 갭의 제한과 같이 큰 변화가 없었으나, 단락전류밀도 및 fill factor의 개선이 크게

이루어졌다. 하지만 450 °C의 고온으로 소성하여 광전극을 형성한 DSSC가 더 큰 효율향상을 보였다. 이는 고온소성을 통해 Ti-TiO₂ 계면에서의 전하의 이동이 더욱 원활히 이루어진 이유로 판단되며, 이를 통해 가장 높은 4.893 %의 효율을 보였다. 이와 같이 Ti foil을 substrate로 사용하여 DSSC를 제작하였을 경우 높은 전기적 특성을 얻을 수는 있으나, 광전극의 substrate가 불투명하여 상대전극으로 태양광이 입사되어 DSSC의 장점으로 여겨지는 투명성 및 심미성의 저하가 발생한다. 이러한 점에서 금속성 광전극의 사용에 따른 심미적 감소와 성능적 개선을 함께 고려해야 할 것으로 보인다.



참고 문헌

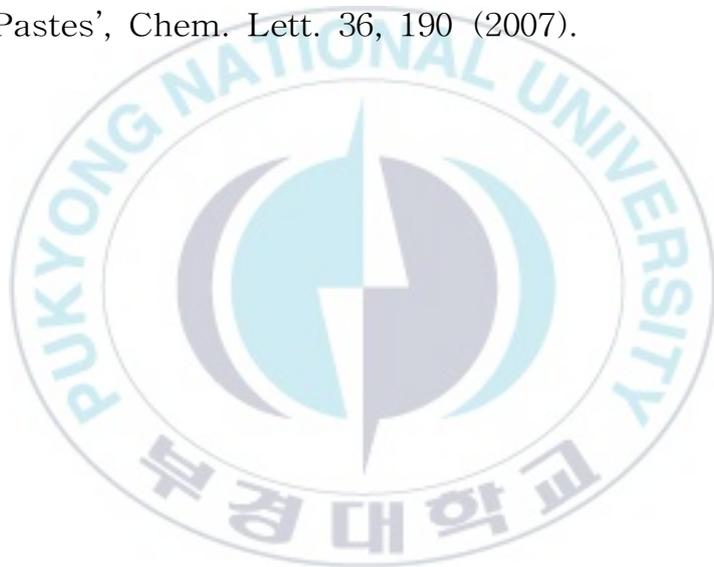
- [1] Slade A, Garboushian V. 27.6% efficient silicon concentrator cell for mass production. Technical Digest, 15th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Shanghai, October 2005, 701.
- [2] Wojtczuk S, Chiu P, Zhang X, Derkacs D, Harris C, Pulver D, Timmons M. InGaP/GaAs/InGaAs concentrators using Bi-facial epigrowth. 35th IEEE PVSC, Honolulu, HI, June 2010.
- [3] King RR, Boca A, Hong W, Liu X-Q, Bhusari D, Larrabee D, Edmondson KM, Law DC, Fetzer CM, Mesropian S, Karam NH. Band-gap-engineered architectures for high-efficiency multijunction concentrator solar cells. Presented at the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 21-25 September 2009.
- [4] <http://www.morgansolar.com/product/how-it-works>
- [5] 박원규, 전동환, 박상혁, 다중접합 태양전지 측정기술, 한국광전자학회지 p. 59, Vol. 1, No. 1, 2011.
- [6] Andy Longford and Domenic Federici, "Smart packages for CPV cell devices", p.9, Vo. 3, No. 5, 2010.
- [7] 박원규 외, "고집광 태양광 발전 기술", OPTICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2012. 7.
- [8] All Digital Right Reserved. Journal of Korea Sola Energy Society Vol.27, No.3. 2007.
- [9] 권성열, 심창수, 대한전기학회 학술대회 논문집, Vol.2017,

No.10, 2017

[10] Hysterisis in organic-inorfanic hybrid perovskite solar cell(Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2016)

[11] 허범, 저온소성 방식으로 형성된 광전극을 이용한 DSSC 효율특성, 부경대학교 산업대학원 학위논문 2020.

[12] Y. Kijitori, M. Ikegami, and T. Miyasaka. ‘Highly Efficient Plastic Dye-sensitized Photoelectrodes Prepared by Low-temperature Binder-free Coating of Mesoscopic Titania Pastes’, Chem. Lett. 36, 190 (2007).



감사의 글

학사 졸업 후 전기공학(電氣工學) 석사과정을 돌이켜보면 한 편의 논문이 그간의 노력을 말해주는 듯합니다. 힘들게 용기내어 시작한 배움의 시간들이 어느덧 한 과정의 씬표를 찍고 있습니다.

지친 몸을 이끌며 직장생활과 학업을 병행하던 시간들이 그림고 아쉬움이 남는 순간입니다. 전기공학을 시작하며 지금은 어엿한 전기분야 실무를 진행 하지만 배움에 대한 열망과 지식에 대한 목마름은 시간이 지날수록 더해가는 듯합니다.

교수님들과 많은 분들의 지도와 가르침으로 배움의 결과물인 이 논문을 완성 할 수 있었습니다. 논문을 진행하는 동안 항상 초심을 잃지 않게 지도와 가르침을 주신 권성열 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 따듯한 격려와 조언을 해주신 심사위원 배종일 교수님, 허영환 교수님께 깊은 감사의 말씀 올립니다. 그리고 사소한 것 하나 빠지지 않게 항상 챙겨주신 심창수 박사님 감사드립니다.

배움은 끝이 없듯이, 지금의 작은 한걸음에 만족하지 않는 사람이 되겠습니다. 항상 도움을 주신 분들께 진심으로 감사드립니다.

2022년 1월
정 영 기 올림.